

高速公路机电通信系统技术创新与应用研究

魏 烨

广东省高速公路有限公司 广东 广州 510000

摘 要：高速公路机电通信系统技术创新与应用研究围绕系统现状、关键技术、应用场景及实施路径展开。分析传统系统在带宽、实时性等方面的瓶颈，探讨通信技术升级、智能化等创新方向，阐述在监控应急、收费等场景的应用，提出分阶段推进等保障措施。这些内容为系统升级提供思路，推动其向高效、智能方向发展，助力智慧交通建设。

关键词：高速公路；机电通信系统；技术创新；5G/6G；车路协同

引言：高速公路机电通信系统是交通管控与信息交互的核心支撑。传统系统存在带宽有限、实时性不足、兼容性差等问题，难以满足现代交通需求。随着智慧交通发展，对系统传输效率、稳定性及智能化水平要求提升。研究其技术现状、创新方向、应用场景及实施路径，旨在突破现有瓶颈，提升系统性能，为高速公路高效运行与安全保障提供技术支持，适应交通行业转型升级需求。

1 高速公路机电通信系统技术现状分析

1.1 传统通信系统架构与功能

有线通信与无线通信在高速公路机电系统中形成互补协同的架构。光纤凭借低损耗、高稳定性的特性，承担主干网络的数据传输任务，连接沿途各收费站、监控中心与管理节点，保障大容量信息的长距离传递。同轴电缆则多用于短距离设备连接，如收费站内部的终端与服务器之间的信号传输，其抗干扰特性适应复杂的现场环境^[1]。无线通信中的专用短程通信技术覆盖收费站与车辆的近距离交互，微波通信则用于填补有线网络难以到达的区域，如山区、桥梁等地形复杂地段，实现通信覆盖的无缝衔接。监控子系统需要实时传输高清视频画面与设备状态信息，对通信链路的稳定性与连续性要求较高。收费系统侧重交易数据的快速传递，需确保支付信息准确无误且延迟极低。应急指挥系统依赖双向通信能力，既要实时接收现场险情报告，又要快速下达调度指令，对通信的可靠性与响应速度有严格标准。这些子系统的通信需求各有侧重，共同构成高速公路机电通信系统的功能体系。

1.2 现有技术瓶颈与挑战

带宽限制导致多系统并发运行时出现传输拥堵。高清监控视频、实时交通数据与收费信息同时传输时，现有通信链路难以满足所有数据的即时传递，部分非关

键信息被迫延迟发送，影响系统整体响应效率。实时性不足在应急场景中尤为明显，险情上报与指挥指令传递过程中的延迟，可能错过最佳处置时机。多系统兼容性问题源于不同时期建设的子系统采用各异的通信协议与数据格式。监控系统与收费系统的数据编码规则存在差异，信息交互时需经过繁琐的格式转换，增加处理环节与出错概率。数据孤岛现象随之产生，各子系统的信息难以自由流通，无法形成统一的数据分析基础，制约综合决策能力的提升。抗干扰能力不足体现在外界信号对通信链路的影响。周边无线设备的频段干扰可能导致专用短程通信出现信号丢失，车辆高速行驶产生的多普勒效应也会干扰数据传输稳定性。极端环境下，高温、暴雨、强风等天气条件会影响光纤与无线设备的物理性能，导致信号衰减或中断，山区隧道内的信号反射与屏蔽效应进一步加剧通信不稳定问题，对系统的持续运行构成挑战。

2 关键技术创新方向

2.1 通信技术升级

5G/6G在高速公路场景的定制化应用聚焦低时延、高可靠与大连接特性。针对隧道、桥梁等特殊路段优化信号覆盖，通过基站协同切换减少通信中断，确保车辆高速移动中的连接稳定性。业务切片技术为不同应用分配专属资源，收费数据传输与应急指挥信号在同一网络中独立运行，互不干扰^[2]。网络管理系统可根据车流量变化动态调整切片容量，高峰时段自动扩容保障通信流畅。软件定义网络与网络功能虚拟化的融合架构打破传统硬件依赖，网络控制逻辑与转发功能分离，通过集中控制器动态调整传输路径。虚拟化技术将各类网络功能封装为软件模块，按需部署在通用服务器上，设备升级无需更换硬件，仅通过程序更新实现功能扩展，网络弹性显著提升。控制器内置智能诊断模块，可自动识别网络拥

塞点并重新规划路由。

2.2 智能化与自动化技术

边缘计算与车路协同的实时数据处理模式将计算能力下沉至路侧设备,车辆与道路设施产生的数据在本地完成分析,避免云端传输延迟。路侧单元实时解析车辆位置、速度信息,结合路况生成预警信号,直接推送至周边车辆,缩短反应时间。路侧设备还能同步接收相邻路段的交通数据,实现区域协同决策。人工智能在故障预测中通过分析设备运行数据,识别温度、电流等参数的异常变化,提前预判潜在故障。流量调度时依据历史通行规律与实时车流量,动态调整信息发布内容,引导车辆分流。算法模型持续学习交通态势变化,决策精度随数据积累不断提升,可自动适配不同天气条件下的交通特性。

2.3 网络架构优化

异构网络融合的冗余设计整合卫星、地面与车载通信资源,形成多层次备份机制。地面网络中断时,卫星通信自动接管核心数据传输,车载自组织网络通过车辆间短距离通信维持局部信息交互。这种架构在自然灾害等极端情况下仍能保障基本通信功能,网络管理模块可实时监测各层级链路状态并触发切换机制。区块链技术通过分布式账本记录数据流转轨迹,每笔信息都经过节点验证并生成不可篡改的记录。收费交易与设备运维数据上链后,来源可追溯且无法伪造,减少数据篡改风险,为跨部门数据共享提供可信基础。链上数据采用加密分段存储,仅授权节点可访问完整信息。

2.4 能源与环保技术

绿色通信技术推广低功耗芯片与节能硬件设计,设备在轻负载时自动进入休眠模式,降低待机能耗。太阳能供电系统与储能设备结合,为偏远路段的监测终端提供能源,减少电网布线成本与碳排放。储能设备采用智能充放电管理,根据日照强度与设备功耗自动调节工作模式。电磁辐射控制通过优化天线布局与功率调节,使信号覆盖集中于道路区域,降低对周边环境的影响。设备采用模块化设计,退役后可拆解回收核心部件,材料循环利用率提升,减少电子废弃物处理压力。路侧设施外壳使用可降解材料,自然环境中可逐步分解,降低长期污染风险,外壳表面添加防腐涂层延长使用寿命。

3 技术创新应用场景与功能实现

3.1 智能监控与应急管理

多源数据融合的实时态势感知系统整合摄像头、传感器、车辆定位等信息,构建全域交通图景。路侧设备采集的车流速度、密度数据,与气象监测的能见度、

降水信息相互印证,生成综合路况判断。异常事件发生时,系统自动关联周边监控画面,快速识别事故类型与影响范围。系统可同时接入消防、医疗等外部数据,形成联动处置基础^[3]。自动化应急响应与资源调度策略依据事件等级启动对应预案。轻微事故触发路侧警示设备,引导车辆绕行;严重情况则同步通知救援力量,规划最优到达路线,协调养护车辆清理现场。救援资源位置信息实时更新,确保调度指令与实际情况匹配,缩短处置周期。调度过程中可自动调整周边交通信号,为救援车辆开辟通道。

3.2 高效收费与电子不停车系统(ETC+)

基于信用体系的无感支付技术将车辆信息与信用账户绑定,通行费自动从账户扣除,无需物理卡片或主动扫码。账户状态实时监测,余额不足时通过提醒避免通行受阻,信用良好用户可享受一定额度的透支服务。支付记录自动同步至用户终端,方便查询与核对。跨区域收费数据协同清算机制打破地域壁垒,各省收费系统通过统一数据接口实现信息互通。车辆跨省通行产生的费用,由清算平台按预设规则拆分至对应路段管理方,结算过程全程留痕,确保资金分配准确无误,减少人工对账环节。清算结果定期生成报表,为各管理方提供运营参考。

3.3 车路协同与自动驾驶支持

高精度定位与动态地图更新服务结合卫星导航与路侧差分信号,提供厘米级位置信息。地图数据实时接收道路施工、临时管制等变动信息,通过无线通信推送至车辆,确保导航与实际路况一致。地图更新频率随路况变化动态调整,施工路段信息更新更为密集。协同式感知与决策信息交互框架让路侧设备与车辆共享感知数据。路侧雷达探测到的盲区障碍物信息,实时传递给附近车辆;车辆也将自身状态反馈至路侧系统,共同构建无死角的安全防护网。决策层面,路侧系统根据全局路况向车辆推送建议车速,实现群体协同避堵。交互过程中采用低延迟通信协议,保障信息传递及时。

3.4 运维智能化与全生命周期管理

数字孪生技术驱动的预测性维护为每处设施构建虚拟镜像,实时映射运行参数。通过比对历史数据与当前状态,预判设备老化趋势,在故障发生前安排检修。桥梁伸缩缝、隧道照明等关键部件的虚拟模型,可模拟不同工况下的损耗过程,优化维护时机。虚拟镜像可模拟不同维护方案的效果,辅助选择最优策略。基于大数据的资产性能评估体系分析设备全生命周期数据,从采购、安装到运维、退役各阶段的成本与效能指标被量化

整合。通过横向对比同类设备表现,纵向追踪单台设备衰减曲线,为资产更新、改造提供依据,实现资源投入与性能保障的平衡。评估结果可指导后续设备采购标准,提升整体资产质量。

4 技术创新实施路径与保障措施

4.1 分阶段推进策略

短期聚焦现有系统升级与局部试点,对运行稳定的路段通信设备进行硬件改造,提升数据传输速率,选择典型路段测试新型通信协议,验证技术可行性。试点区域内同步开展人员培训,编制操作手册细化流程,确保技术落地后能高效操作^[4]。中期着力关键技术标准化与规模化部署,总结试点经验形成技术规范,统一设备接口与数据交互模式,在更大范围推广成熟技术,通过批量应用降低单套系统成本,同时建立技术迭代机制,预留升级空间确保系统兼容性。长期目标是实现全行业生态协同与自主可控,构建跨区域技术协作网络,推动核心芯片、操作系统等关键环节自主研发,联合产业链上下游企业攻关,减少对外依赖,形成技术创新、应用落地、效益反哺的良性循环。

4.2 标准化与兼容性设计

接口协议统一与数据格式规范化覆盖设备通信、数据存储等全环节,制定明确的信号传输规则,对数据帧结构、校验方式作出详细规定,确保不同厂商的设备能无缝对接,数据采用通用编码格式,避免因格式差异导致的信息丢失,便于跨系统数据整合。开放架构支持第三方服务接入,通过预留扩展接口允许新功能模块接入现有系统,第三方服务商可基于标准接口开发应用程序,丰富系统功能,用户根据需求选择服务,定期评估服务质量优化选择,提升系统灵活性与扩展性,避免单一供应商垄断带来的局限。

4.3 安全防护体系构建

端到端加密贯穿数据产生、传输、存储全过程,数据在发送端加密处理,接收端解密验证,中间环节无法破解内容,保障信息机密性,加密算法定期更新,结合最新安全研究成果调整密钥长度与加密模式,应对潜在安全威胁。零信任安全模型要求所有访问请求都经过身

份验证与权限审核,无论内外网访问,均需通过多因素认证,结合设备指纹、位置信息强化身份校验,基于最小权限原则分配操作权限,减少越权访问风险。动态威胁监测与自适应防御机制通过智能算法分析网络行为,识别异常连接与数据传输,建立威胁特征库实时更新,发现威胁时自动启动防御措施,如隔离可疑终端、限制异常流量,防御策略随威胁特征变化实时调整,提升防护主动性。

4.4 人才培养与跨领域协作

复合型技术团队建设注重通信、计算机、交通工程等多学科知识融合,通过内部培训与外部引进结合,设计阶梯式培养计划,培养既懂技术原理又熟悉行业需求的人才,建立轮岗机制,让技术人员深入一线了解实际应用场景,参与问题解决积累经验。产学研用深度融合机制促进知识流动与资源共享,企业提供实际应用场景与研发资金,高校与科研机构开展基础研究与技术攻关,共同设立研发项目明确权责,成果由企业负责转化落地,定期召开协作会议同步进展,形成创新合力,加速技术从实验室到实际应用的转化。

结束语

高速公路机电通信系统技术创新与应用研究覆盖多方面内容,为系统升级提供全面方案。技术创新突破传统瓶颈,应用场景拓展系统功能,实施路径保障落地。随着这些技术与措施的推进,系统将更智能、高效、稳定,提升高速公路运行效率与安全性,为智慧交通体系构建奠定基础,推动交通行业持续发展。

参考文献

- [1]张闯辉,钟立聪.高速公路机电通信系统技术创新与应用研究[J].通信电源技术,2024,41(9):184-186.
- [2]韦斌.高速公路机电工程运行管理和维护策略研究[J].数字化用户,2024(27):47-48.
- [3]喻全红.高速公路机电系统中通信系统的应用[J].运输经理世界,2021(23):159-161.
- [4]高吉鹏.现代通信技术在高速公路机电系统中的应用[J].中华建设,2021(02):155-157.